УДК 599:591.471.34/.35

ПРОЧНОСТЬ СКЕЛЕТА У ЖИВОТНЫХ С ИЗМЕНЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ ОПОРЫ

К. П. Мельник

(Институт зоологии АН УССР)

Изучению влияния различных физических факторов на морфофункциональную перестройку костной ткани и скелета локомоторного аппарата человека и животных посвящено много исследований (Лесгафт, 1905; Иваницкий, 1938, 1950; Gondos, 1957; Привес, 1959; Kummer, 1962; Kolar, Babicky, 1965; Никитюк, 1968 и др.).

Влияние физических нагрузок на развитие скелета конечностей изучалось также в экспериментах на животных. В опытах по изменению статики растущих животных путем выключения одной из конечностей или изменения ее опорной функции (Ковешникова, 1951; Данилова и Свиридов, 1953; Радиловская, 1961; Бунак и Клебанова, 1960; Волынский, 1967) было установлено, что повышенная статическая нагрузка приводит к увеличению размеров (главным образом широтных) скелетных элементов более нагруженной (неоперированной) конечности. В скелетных элементах лишенной опоры конечности наблюдались явления редукции костной ткани. Сходные результаты получены в экспериментах на взрослых животных (Котикова, 1927), а также при ампутации стопы у человека (Красуская, Котикова, 1929). Результаты единичных определений механических свойств костной ткани у животных с измененной статикой противоречивы. По данным одних авторов (Semb, 1966), прочность костной ткани при выключении опоры на одну из конечностей не изменяется. В опытах С. И. Рыбаковой (1969) на растущих собаках предел прочности компактной субстанции скелетных элементов ненагруженной конечности, напротив, был ниже (по сравнению со здоровой) во всех сериях экспериментов.

Мы изучали влияния различной физической нагрузки и измененного характера опоры на механические свойства, гистологическую структуру и степень минерализации костной ткани, а также размеры трубчатых костей конечностей (плечевая, кости предплечья, запястья, пястные, бедренная, кости голени, заплюсны и плюсневые) у собаки, кошки и кролика. Особенно интересовало нас время появления изменений в костной ткани после выключения опоры. Для выключения функции опоры кисть левой конечности собак и кошек ампутировали на уровне запястно-пястного сустава. Кролики опытной группы находились в состоянии практически полной иммобилизации. Продолжительность опыта была неодинаковой. Кролики находились в опыте шесть, собаки — шесть и девять месяцев, кошки — год. У подопытных животных сравнивали скелетные элементы правой грудной и тазовой конечностей с соответствующими элементами левой стороны. В экспериментах использовали взрослых животных, чтобы исключить влияние возрастных изменений костной ткани.

Изменения изучали рентгенографически как прижизненно, так и после препарирования скелета. Режим съемки и обработка рентгенограмм — общепринятые. Рентгенографии подвергали целые конечности и отдельные скелетные элементы. При этом обращали внимание на раз-

витие общих и частных признаков (Воккен, 1961; Рохлин, 1957; Мельник, 1966), характеризующих рельеф контуров, внутреннюю структуру костей и особенности отдельных скелетных элементов. Проводили также остеометрические исследования, определяли вес скелетных элементов, развитие компактной субстанции и костно-мозговой полости трубчатых костей. Гистологическую структуру костной ткани изучали на поперечных срезах, окрашенных гематоксилин-эозином после декальцинации, прочность костной ткани при сжатии определяли на образцах кольцевой формы, изготовленных из середины диафиза кости.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что выключение опорной функции конечности приводит к перестройке костной ткани оставшихся скелетных элементов. Рентгенографически наблюдается истончение стенок диафизов плечевой кости и костей предплечья левой конечности (ампутирована кисть) по сравнению со скелетными элементами правой (опорной) конечности (рис. 1). Диафизы лучевой и локтевой костей левой (неопорной) конечности у собак оказались заполненными губчатым веществом, в то время, как костномозговой канал костей предплечья правой конечности был свободен от костных трабекул. У контрольных животных различий в скелете левой и правой стороны не обнаружено. У кроликов, находившихся в состоянии резко выраженной гиподинамии, рентгенографически наблюдалось истончение стенок диафизов трубчатых костей по сравнению с контрольными животными, содержавшимися в клетках.

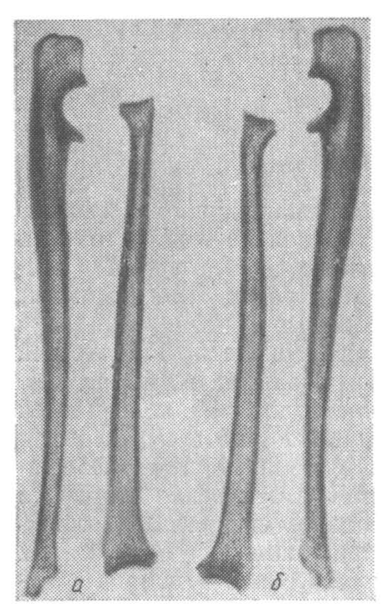


Рис. 1. Рентгенограмма костей предплечья домашней кошки:
а — правой конечности; *б* — левой конечности с ампутированной кистью.

Линейные размеры трубчатых костей подопытных животных практически не изменились при выключении опорной функции одной из конечностей и при гиподинамии. В то же время вес скелетных элементов ненагруженной и опорной конечностей значительно отличается (табл. 1). Вес скелетных элементов левой грудной конечности (лишенной опоры) меньше и составляет 84,85—96,10% веса соответствующих скелетных элементов правой стороны. Различия в весе статистически достоверны. Выключение опоры больше сказалось на скелетных элементах (лучевой и локтевой костях), граничащих с местом ампутации. Это объясняется, очевидно, тем, что в процессе локомоции животного кости предплечья испытывают относительно бóльшие статические и динамические нагрузки, чем плечевая кость. Отсутствие указанных напряжений вызывает более интенсивную перестройку компактной субстанции костей предплечья и меньше сказывается на плечевой кости.

Вес скелета левой грудной конечности уменьшался вследствие истончения стенок диафизов и относительного увеличения костно-мозговой полости. При этом наружные размеры диафиза (передне-задний, внутренне-наружный диаметр и обхват середины диафиза) почти не изменились. Достоверных различий в весе скелета правой и левой тазовых конечностей также не обнаружено. Различия в весе скелета у собак были

хорошо выражены уже через шесть месяцев после начала опыта (выключение опоры на переднюю конечность) и в дальнейшем мало изменились. Сходные изменения веса скелета неопорной конечности наблюдались у кошки, хотя количественно они были менее выражены, чем у собаки. Это, очевидно, можно объяснить характером локомоции кошачьих. Известно, что кошки — в силу особенностей строения конечностей и экологии — передвигаются значительно «мягче», чем собаки, и их конечности испытывают в процессе локомоции относительно меньшие напряжения. У подопытных кроликов, находившихся в состоянии иммобилизации, относительный вес плечевой и большеберцовой костей уменьшался, а вес костей предплечья и бедренной кости увеличивался по сравнению с весом соответствующих скелетных элементов у контрольных животных.

Таблица 1

Вес скелетных элементов конечностей у подопытных собак через девять месяцев после ампутации левой кисти (n=5)

Кость	Вес кости конечности, *г*		Отношение I/II, %
	левой (I)	правой (II)	
Плечевая	74,0±0,71	77,0±1,32	96,10
Лучевая	28,0±1,14	33,0±0,68	84,85
Локтевая	24,0±1,02	27,0±0,63	88,89
Кости запястья	7,3±0,01	8,4±0,41	86,90
Пястные	—	18,0±0,72	—
Бедренная	77,0±2,76	78,0±1,21	98,72
Большеберцовая	63,0±2,10	63,0±2,06	100,00
Кости заплюсны	30,0±1,14	29,0±1,10	103,45
Плюсневые	19,0±0,49	19,4±0,32	97,94

Уменьшение веса скелета ненагруженной конечности явилось результатом приспособительной перестройки костной ткани и уменьшения толщины стенок диафизов, относительное развитие которых может быть выражено индексом компакты (отношение площади компактной субстанции к площади поперечного сечения середины диафиза кости). Относительная толщина стенок оставшихся звеньев оперированной конечности собаки была значительно меньше таковой скелетных элементов опорной конечности. Разница составляет 7,18—9,28% и достоверна. Наибольшие различия наблюдали на костях предплечья. Выключение опоры на левую переднюю конечность отразилось и на скелетных элементах тазовых конечностей, однако в меньшей степени (табл. 2). Сходные, хотя и слабее выраженные, изменения стенок диафизов скелетных элементов конечности были у домашней кошки. Практически полная иммобилизация подопытных кроликов привела к значительному уменьшению массы компактной субстанции, снижению минеральной насыщенности и резкому истончению стенок диафиза трубчатых костей грудных и тазовых конечностей. Различия в индексе компакты достигали 7,69—18,88%. Однако характер изменения индекса компакты по длине конечности соответствовал таковому у других млекопитающих (Мельник, 1968), т. е. индекс увеличивался в дистальном направлении.

Для гистологической картины середины диафиза плечевой кости опорной конечности собаки характерно наличие большого количества остеонов (рис. 2, *б*). Основными структурными компонентами являются периостальный и мезостальный слои кости. Эндостальный слой кости развит лишь в медиальной стенке диафиза. В ненагруженной кости

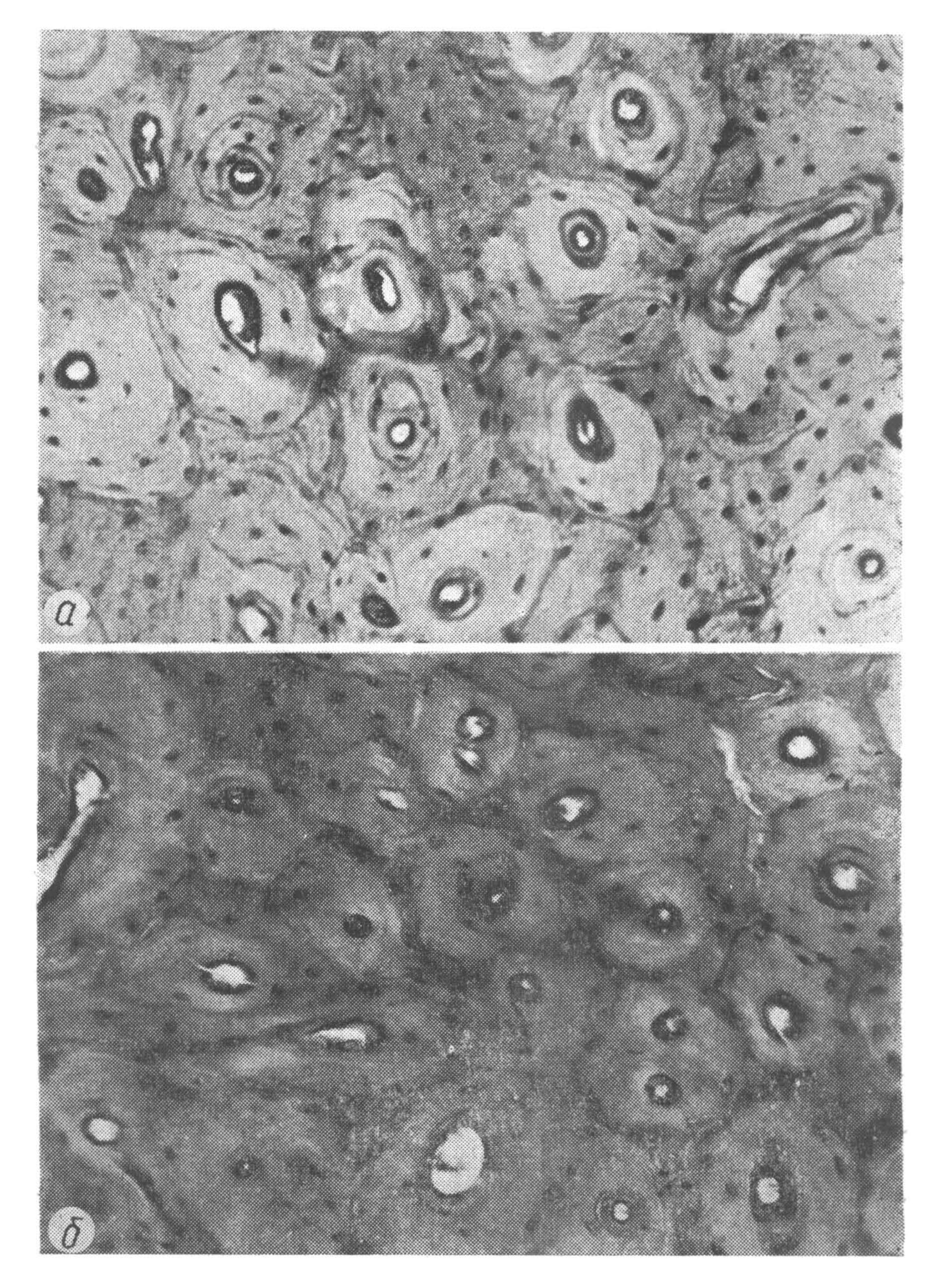


Рис. 2. Поперечный срез дорсальной стенки плечевой кости собаки:
а — левой конечности с ампутированной кистью; *б* — правой опорной конечности (Об. 9,5; ок. 10).

(рис. 2, *а*) развиты все три слоя компактной субстанции, однако остеоны расположены реже, имеются резорбционные полости. Мезостальный слой преобладает, однако функциональная перестройка идет в основном со стороны эндоста, что приводит к увеличению просвета костномозговой полости. Гистологическая структура костей предплечья отражает процессы перестройки костной ткани, более интенсивно протекающие в этих скелетных элементах. В строении компактной субстанции трубчатых

костей тазовых конечностей левой и правой стороны существенных различий не было.

Механическая прочность диафиза и кости как органа в значительной мере зависит от степени развития компактной субстанции и ее гистологической структуры. В табл. 2 представлены результаты испытаний трубчатых костей подопытных собак на сжатие. Предел прочности костной ткани (величина разрушающей нагрузки, приходящаяся на единицу площади образца) трубчатых костей левой передней конечности, лишенной опоры, был ниже такового скелетных элементов правой опорной конечности. При этом различия в прочности плечевых костей оказались меньше (0,32 *кг/мм*²), чем лучевой (2,20 *кг/мм*²) и локтевой костей (1,89 *кг/мм*²). Прочность левой бедренной кости также была ниже, нежели правой. Сходные результаты получены при исследовании механических свойств скелетных элементов конечностей у домашней кошки. У животных с измененным характером опоры прочность костной ткани увеличивалась от проксимальных звеньев конечности к дистальным, что характерно и для других млекопитающих. Предел прочности костной ткани кроликов, находившихся в состоянии иммобилизации, был ниже по сравнению с таковым животных контрольной группы. Отсутствие динамических нагрузок наиболее резко сказалось на прочности проксимальных скелетных элементов конечностей.

Таблица 2

Развитие и механические свойства трубчатых костей конечностей подопытных собак через девять месяцев после ампутации левой кисти

Кость		Площадь в среднем сечении, *мм*²		Индекс компакты, %	Предел прочности *кг/мм*²
		диафиза	компакты		
Плечевая	л.	160±3,85	83±1,48	51,88	13,52±0,18
	п.	158±2,61	98±1,13	62,02	13,84±0,10
Лучевая	л.	89±3,91	57±1,79	64.05	15,34±0,76
	п.	90±5,38	66±2,43	73,33	17,54±1,03
Локтевая	л.	30±1,13	21±1,00	70,00	16,83±0,79
	п.	30±0,72	23±0,69	76,67	18,72±0,93
Пястная	л.	—	—	—	—
	п.	32±0,47	26±0,34	81,25	21,92±1,12
Бедренная	л.	150±3,30	77±1,64	51,33	14,60±1,37
	п.	148±1,74	84±2,13	56,76	17,80±1,83
Большеберцовая	л.	132±2,34	93±1,20	70,45	18,92±0,68
	п.	131±3.18	94±0,78	71,76	18,11±0,32
Плюсневая	л.	36±1,30	26±0,62	72,22	21,88±0,41
	п.	34±0,92	26±0,87	76,47	21,20±0,37

Примечание: л. — левая, п. — правая.

Таким образом, выключение опоры на одну из конечностей вызывает повышенную физическую нагрузку на конечность другой стороны. Трубчатые кости ненагруженной конечности перестраиваются, при этом их вес относительно уменьшается. Толщина стенок диафизов и площадь компактной субстанции, суммарная разрушающая нагрузка и предел прочности костной ткани также уменьшаются. Нарушается минеральный обмен в скелетных элементах, лишенных опоры, количество золы в костной ткани уменьшается на 4,8—6,1% по сравнению с контролем. Сходные изменения в скелете конечностей наблюдались при отсутствии динамических нагрузок у животного (иммобилизация). Повышенная нагруз-

ка на опорную конечность приводит к т. н. «рабочей» гипертрофии трубчатых костей — сужению костномозгового канала, утолщению стенок диафизов. Прочность костной ткани при этом также повышается.

ЛИТЕРАТУРА

Бунак В. В., Клебанова Е. А. 1960. Влияние усиленной механической нагрузки на формирование костей конечностей у растущих животных. Архив АГЭ, т. XXXVIII, в. 5.

Воккен Г. Г. 1961. Костный скелет конечностей у молодняка крупного рогатого скота (рентгено-анатомическое исследование). Тр. VI Всес. съезда АГЭ, т. 2.

Волынский Ф. А. 1967. Реактивность элементов опорно-двигательного аппарата животных при изменении их функции. Сб. науч. тр. Одесского с.-х. ин-та. Одесса.

Данилова Е. И., Свиридов А. И. 1953. Рост и окостенение скелета конечностей в условиях экспериментально измененной нагрузки. Зоол. журн., т. XXXII, в. 4.

Иваницкий М. Ф. 1938. Движение человеческого тела. М.

Его же. 1950. Физические упражнения как формообразующий фактор в развитии скелета человека. Тез. докл. на конф. Центр. ин-та физкультуры, в. 10. М.

Ковешникова А. К. 1951. Влияние измененной статики животного на строение его мышц и скелета. Изв. Акад. пед. наук РСФСР, в. 35.

Котикова Е. А. 1927. Материалы к исследованию условий, влияющих на форму костей. Изв. науч. ин-та им. П. Ф. Лесгафта, т. 13, в. 1.

Красуская А. А., Котикова Е. А. 1929. Исследование мышц и костей нижней конечности после ампутации левой стопы. Там же, т. 15, в. 1—2.

Лесгафт П. Ф. 1905. Основы теоретической анатомии, ч. I. СПб.

Мельник К. П. 1966. Некоторые особенности развития скелета конечностей молодняка крупного рогатого скота при различных условиях выращивания. В сб.: «Корма и кормление с.-х. животных», в. 7. К.

Его же. 1968. Структура костей конечностей некоторых копытных в связи с условиями их функционирования. В сб.: «Общие закономерности морфогенеза и регенерации». К.

Никитюк Б. А. 1968. Влияние механической нагрузки на рост трубчатых костей кисти человека. Архив АГЭ, т. LV, в. 8.

Привес М. Г. 1959. Некоторые итоги исследования влияния труда и физических упражнений на строение аппарата движения человека. Там же, т. XXXVI, в. 5.

Радиловская Р. Г. 1961. Влияние экспериментально-измененной нагрузки на перестройку скелета метаподия и пальцев у некоторых стопо-, пальцеходящих млекопитающих. Тр. VI Всес. съезда анат., гистол. и эмбриол. Харьков.

Рохлин Д. Г. 1957. Кости и суставы в рентгеновском изображении. В кн.: «Конечности». М.—Л.

Рыбакова С. И. 1969. Влияние нагрузки на механические свойства и минеральный обмен костной ткани в период ее роста и развития. Мат-лы 9-й науч. конф. по возр. морф., физиол. и биохим., т. I. М.

Gondos B. 1957. Tennis elbow: a reevaluation. Amer. J. Rentgenol., v. 79. № 4.

Kolar J., Babicky R. 1965. The physical agents and bone. Prague.

Kummer B. 1962. Funktioneller Bau und funktionelle Anphassung des Knochens. Anat. Anz.. Bd. 111, H. 4.

Semb H. 1966. The breaking strength of normal and immobilized cortical bone from dogs. Acta orthop. Scand., v. 37, № 2.

Поступила 2.VIII 1971 г.

STRENGTH OF SKELTON IN ANIMALS WITH A CHANGED TYPE OF SUPPORT

K. P. Melnik

(Institute of Zoology, Academy of Sciences, Ukrainian SSR)

Summary

An effect of different physical loading and a changed character of the support was studied as applied to mechanical properties, histological structure, mineralization degree and size of tubular bones in dog, domestic cat and rabbit limbs.

It is established that when one of the limbs is eliminated as a support the physical loading for the limb of the other side increases. Skeletal elements of the unloaded limb are subjected to rearrangement accompanied by a relative decrease in their weight. Thickness of the diaphysis walls and the area of compact substance total destructing loading and ultimate strength of bony tissue also decrease. Mineral metabolism in skeletal elements without a support is disturbed and ash amount in them is reduced.

Similar changes were observed when dynamic loadings in animals are absent.